

# Rozdíly v konstrukci a činnosti laserů - příklady různých řešení

Bc. Jaroslav Zůda

14. ledna 2008

## Abstrakt

V této seminární práci je popsána konstrukce laserů a základní principy jejich činnosti. V úvodu je stručně popsána historie a nastíněna možná budoucnost. V závěrečné části jsou popsány některé v současnosti používané aplikace.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Historie laserů</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Konstrukce laseru</b>	<b>2</b>
2.1	Rezonátor . . . . .	2
2.2	Aktivní prostředí . . . . .	3
2.2.1	Pevná látka . . . . .	3
2.2.2	Plyn . . . . .	3
2.2.3	Kapalina . . . . .	4
2.2.4	Polovodič . . . . .	4
2.3	Zdroj čerpání . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Činnost laserů</b>	<b>5</b>
3.1	Kontinuální režim . . . . .	5
3.2	Synchronizace módů . . . . .	5
3.3	Modulace kvality . . . . .	5
3.4	Čerpování . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Příklady laserových systémů</b>	<b>6</b>
4.1	Prague Asterix Laser System . . . . .	7
4.2	Laserové ukazovátko . . . . .	7
4.3	Operace očí . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>8</b>

# 1 Historie laserů

Základy byly položeny již v roce 1917 jedním z nejznámějších vědců všech dob, Albertem Einsteinem. V článku [1] zavádí pravděpodobnostní koeficienty pro absorpci, spontánní emisi a stimulovanou emisi, které se nyní označují jako Einsteinovy koeficienty. V dalších letech pak byla potvrzena stimulovaná emise a navržen princip optického čerpání, za což byla roku 1966 udělena Nobelova cena Alfredu Kaslerovi.

První zařízení schopné zesílit záření bylo sestrojeno v roce 1953 v USA Charlesem H. Townesem a jeho studenty Jamesem P. Gordonem a Herbertem J. Zeigerem. Nezávisle na problému pracovali též sovětsí fyzici Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov. Obě skupiny objevily pulzní maser, za nějž dostali v roce 1964 Nobelovu cenu.

V dalších letech se výzkum ubíral směrem k viditelné oblasti elektromagnetického pole. Princip laseru byl popsán pouhé 4 roky po objevu maseru. Sestrojen byl o další 3 roky později, v roce 1960, a to Theodorem H. Maimanem v Malibu. Pro generaci světla o vlnové délce 694 nm použil rubínový krystal. V téže roce byl sestrojen také plynový  $He - Ne$  laser. V roce 1962 byly sestrojeny první polovodičové lasery, které ale musely být chlazeny tekutým dusíkem. První kontinuální polovodičový laser pracující za pokojových teplot byl sestrojen až v roce 1970. Až do dnešní doby bylo objeveno mnoho látek, které mohou zesilovat záření. V roce 1992 byla objevena možnost zesilování bez nutnosti dosažení inverze populací hladin v sodíku.

## 2 Konstrukce laseru

Každý laser obsahuje tři základní části, a to rezonátor, kde se zesiluje světlo, aktivní prostředí a zdroj optického čerpání. Jednotlivé druhy pak mohou mít další příslušenství, jako například chlazení optického zdroje nebo krystal měnící vlnovou délku výstupního svazku.

### 2.1 Rezonátor

V nejjednodušším případě je rezonátorová komora tvořena dvěma zrcadly, z nichž jedno odrazí veškeré světlo, druhé je propustné, přičemž požadovaná propustnost se liší v závislosti na druhu provozu. V kontinuálním režimu budeme chtít vysokou odrazivost, v pulzním režimu platí opak, veškeré světlo budeme chtít dostat ihned pryč. Existují také lasery, kde zisk v aktivním prostředí je tak vysoký, že zrcadel není vůbec třeba.

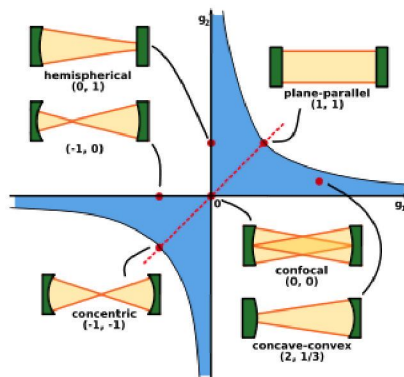
V praxi se nejčastěji používají systémy tří nebo čtyř zrcadel. Použití dalšího zrcadla totiž omezuje některé vady, které se projevují v dvouzrcadlovém systému, jako například astigmatismus.

V ukázkových příkladech se obvykle setkáváme se dvěma planoparalelními zrcadly (tzv. Fabry-Perotův rezonátor). Obecně existuje několik typů zrcadel, která musí splňovat vztah

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1, \quad (1)$$

kde  $L$  je optická vzdálenost zrcadel,  $R_1$  a  $R_2$  jejich poloměry křivosti. Pokud si označíme  $g_1 = \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)$  a  $g_2 = \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)$ , můžeme vytvořit graf (viz obr. 1) a z něj zjistit tvar zrcadel, pro který je rezonátor stabilní. Jak je vidět, zrcadlo může být i konkávní, což se může na první pohled zdát jako nesmyslné.

Zrcadlo samotné může být vyrobeno z různých materiálů v závislosti především na vlnové délce a výstupním výkonu. V současné době se pro optickou oblast využívá například BK7 nebo křemenné sklo. V infračervené oblasti, kde dominuje  $CO_2$ , křemen není vhodný, takže je nutné použít jiné materiály, jako například slitinu zinku a selenu. V laserech s nízkým výkonem se používají germaniová skla. Jako zrcadlo se pak používá křemík.



Obrázek 1: Stabilní oblast rezonátoru

## 2.2 Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je typickou charakteristikou laseru, protože rozhoduje o vlnové délce a možnostech provozu. Doposud bylo objeveno mnoho látek všech skupenství, a to včetně polovodičů. Dokonce se ukazuje, že vhodným prostředím pro generaci gama laseru může být Bose-Einsteinův kondenzát.

### 2.2.1 Pevná látka

První sestrojený laser byl právě pevnolátkový, přesněji z krystalu rubínu. V dalších letech se ukázalo, že některé látky mají lepší vlastnosti, a proto se od rubínového laseru upouštělo. Stále má uplatnění například v holografii.

Mezi materiály s lepšími vlastnostmi patří různá skla nebo granáty. Výsadní postavení má v současnosti neodýmový laser (Nd:YAG) na vlnové délce 1064 nm. Jak je patrné ze zkratky, jde o yttriový granát dopovaný neodýmem, přičemž jeho obvyklé množství je asi 1 % hmotnosti. Yttriový granát se používá jako základ i pro další typy, protože je zvládnuta jeho syntetická výroba.

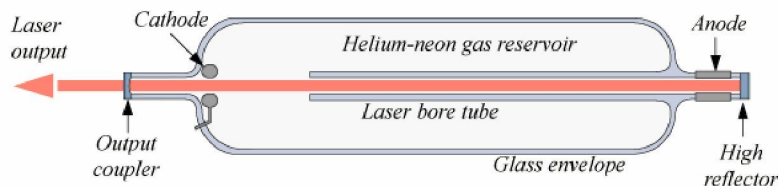
Většinou tedy jde o krystalický nebo jinak dobře zpracovatelný materiál. Lze ho vytvarovat do tyčinky kruhového nebo jiného průřezu a na konce se může snadno napařit odrazná vrstva reprezentující rezonátor, jak bylo posáno v předchozí části.

### 2.2.2 Plyn

Plynové lasery mají oproti pevnolátkovým a dalším typům některé výhody, především levnější aktivní médium, což platí především u  $CO_2$  nebo dusíku. Jsou také jednodušší na sestavení, jak je vidět na příkladu He-Ne laseru (viz obr. 2). Podobná konstrukce je i u jiných laserů.

Asi nejvíce používaným plynem je  $CO_2$ , který vyzařuje na vlnových délkách 9,4 – 10,6  $\mu\text{m}$ . Ve skutečnosti v aktivním prostředí není čistý plyn, ale směs s dalšími plyny, přičemž významnou úlohu hraje dusík, který po vybuzení na vyšší vibrační hladinu přejde srážkou s  $CO_2$  zpět, zatímco dochází k populační inverzi. Lze dosáhnout vysokých výkonů vhodných k úpravám materiálů, jako například řezání nebo obrábění.

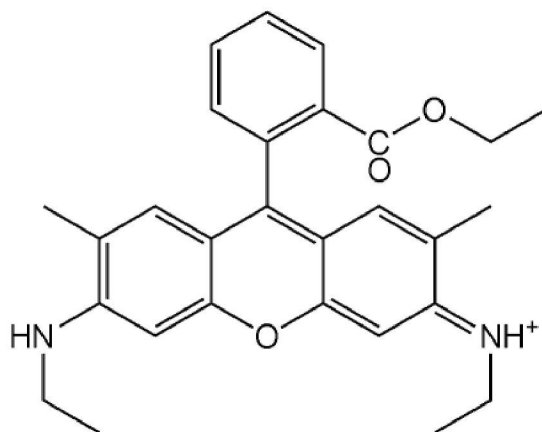
Zvláštní kapitolou jsou excimerní lasery, které se využívají pro ultrafialovou oblast. Aktivní prostředí je tvořeno většinou dvěma plyny, z nichž jeden bývá inertní plyn (Ar, Kr, Xe) a druhý silně reaktivní (Cl, F). Za určitých podmínek se vytvoří excitovaná molekula. Ta deexcituje samovolnou nebo stimulovanou emisí a dojde k rozpadu molekuly. Právě excimerních laserů využívá metoda LASIK na odstraňování očních vad.



Obrázek 2: Základní schéma He-Ne laseru

### 2.2.3 Kapalina

V této oblasti jsou známy především barvivové lasery, které mají větší rozsah vlnových délek než většina jiných druhů, takže se dají přeladovat ve větší škále vlnových délek. Na druhou stranu používáním degradují, takže je nutné častěji měnit aktivní prostředí. Lze toho dosáhnout například tak, že barvivo bude protékat kyvetou nebo bude vstřikováno do prostoru. Na obrázku 3 je chemická struktura jednoho často používaného barviva, rhodaminu 6g.



Obrázek 3: Struktura barviva Rhodamine 6G

### 2.2.4 Polovodič

S polovodičovými lasery se setkáváme snad každý den, například v laserových tiskárnách nebo optických mechanikách. Hlavním prvkem je laserová dioda, která byla poprvé vyrobena v roce 1962.

Princip činnosti je podobný LED diodě. K zesilování světla dochází na PN přechodu v prostoru, kde dochází ke vniknutí elektronů z oblasti N. Pokud nastane situace, že elektron a díra jsou ve stejné oblasti, mohou rekombinovat. Tím může vzniknout foton, který poté může vybudit stimulovanou emisi u jiné dvojice elektron-díra.

Některé vlastnosti laserových diod jsou dány jejichmi rozměry. Pokud je dioda široká oproti vlnové délce světla, vzniká několik módů a lze dosáhnout vysokých výkonů za cenu vysoké rozbíhavosti paprsku. Pokud je aktivní prostředí srovnatelné s vlnovou délkou, vzniká jednomodový paprsek, který má nízký výkon, ale menší rozbíhavost, takže se lépe hodí například do ukazovátek nebo do optoelektroniky.

## 2.3 Zdroj čerpání

Aby mohlo vůbec dojít k vyzáření laserového paprsku, je nutné dosáhnout inverze populací hladin, ke které potřebujeme určitý zdroj čerpání. Ačkoliv to podle nákresů v popularizačních publikacích nevypadá, takovým zdrojem může být i jiný prvek než lampa, která se využívá především u pevnolátkových laserů.

U plynových laserů je častým zdrojem elektrický výboj. Obvykle dochází k excitaci jednoho prvku a k přenosu energie srážkou. Tím se vybudí druhý prvek, který pak může vyzářit stimulovanou emisi.

Polovodičové lasery jsou buzeny výhradně elektrickým proudem, aby byl zajištěn přísun elektronů a děr do oblasti, ve které dochází ke stimulované emisi. Tento druh zároveň slouží jako zdroj pro jiné lasery, například pevnolátkové nebo barvivové.

## 3 Činnost laserů

Lasery mohou pracovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu. Dá se ukázat, že pro provoz kontinuálního potřebujeme alespoň 4-hladinový systém, zatímco pro pulzní režim stačí systém tříhladinový. Do dnešní doby bylo objeveno a vyvinuto několik druhů pulzních režimů.

### 3.1 Kontinuální režim

Pokud je do aktivního prostředí dodávána energie trvale, dochází neustále k obnovování inverze, a tak je možné dosáhnout toho, že laserový paprsek bude kontinuální. Takový postup má jednu nevýhodu, a to možnost přehřátí systému z důvodu trvalého buzení. Tomu lze zabránit tak, že zdroj čerpání bude spuštěn jen v určitých okamžicích tak, aby nedošlo k přehřátí.

### 3.2 Synchronizace módů

V rezonátoru se nezesilují všechny vlnové délky, ale jen takové, které splňují podmínku stojatého vlnění. Jednotlivé módy nejsou obvykle synchronizované, a tak bývá puls relativně dlouhý. Lze ale dosáhnout synchronizace, kdy se doba trvání pulzu může zkrátit až na jednotky femtosekund, a to podle vztahu

$$t = \frac{0,44}{N\Delta\nu}, \quad (2)$$

kde  $N$  je počet módů ve spektrální čáře a  $\Delta\nu$  jejich frekvenční vzdálenost.

Velmi krátkých pulzů lze dosáhnout aktivní nebo pasivní synchronizací. Aktivní využívá akustoptický nebo elektro-optický člen, který mění své vlastnosti. Frekvence změn tohoto členu musí být upůsobena době oběhu pulzu v rezonátoru

$$\tau = \frac{2L}{c}, \quad (3)$$

kde  $L$  je délka rezonátoru. Pak dochází k útlumu některých módů, zatímco jiné jsou posilovány. Tím dochází ke zkracování pulzu.

Pasivní synchronizace je podobná aktivní, narozdíl od ní není nutná synchronizace. Členem, který ovlivňuje kvalitu laseru, je absorbér, který mění své vlastnosti v závislosti na dopadající intenzitě. Pokud je dopadající světlo slabé, je absorbováno. Při určité intenzitě se absorbér saturuje a je pro světlo průhledný. Z toho je zřejmé, že takový druh provozu není samostartovací. Při vhodné volbě absorbéru lze dosáhnout ještě kratších pulzů než s aktivním členem.

### 3.3 Modulace kvality

Režim modulace kvality je podobný synchronizaci módů. V tomto případě je regulována kvalita optického rezonátoru. Využívá se pro generaci nanosekundových pulzů.

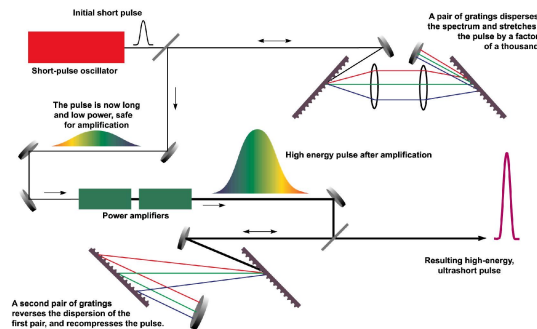
Modulace kvality může být prováděna jak aktivně, tak pasivně. V rezonátoru je umístěn prvek, který v základním stavu snižuje kvalitu. Laser tak nemůže zářit. Po určité době dojde k saturaci zesílení v aktivním prostředí. Pokud v takovém momentu dojde k výraznému zvýšení kvality rezonátoru, vyzáří se velmi intenzivní laserový paprsek. Pokud doba zvýšení kvality trvá dostatečně dlouho, může dojít k vyzáření sekundárního pulzu, protože po určitém čase dojde k vyrovnání zesílení a ztrát, které jsou v té době ještě na nízké úrovni.

### 3.4 Čerpování

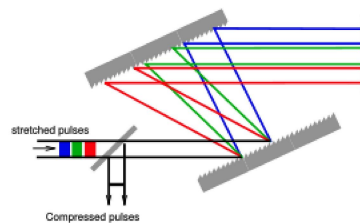
Tato metoda slouží k vytváření pulzů o velmi vysoké energii v řádu až petawattů. Takový pulz už může zničit aktivní prostředí nebo optiku na dráze.

Při čerpování je vyslán pulz. Aby mohl být zesílen, aniž by se cokoliv zničilo, je nutné pulz prodloužit a tím i snížit maximální energii. Pak je možné bezpečné zesílení. Po zesílení je možné pulz opět zkrátit a tím tak dosáhnout maximální energie.

Prodlužování a zkracování pulzu lze dosáhnout přidáním některých prvků do dráhy. Mohou se použít mřížky nebo hranoly. Pro obě platí, že pro různé vlnové délky se světlo jinak odráží. Vhodným uspořádáním lze dosáhnout toho, že každá vlnová délka projde jinak dlouhou dráhou, čímž dojde k prodloužení nebo zkrácení pulzu. Na obrázku 4 je zakresleno celkové uspořádání takového laseru, na obrázku 5 bližší pohled na mřížku, na které dochází ke zkrácení pulzu.



Obrázek 4: Laser s čerpáním



Obrázek 5: Rozkladné mřížky

Téměř všechny lasery s výkonem nad 100 GW využívají právě čerpování.

## 4 Příklady laserových systémů

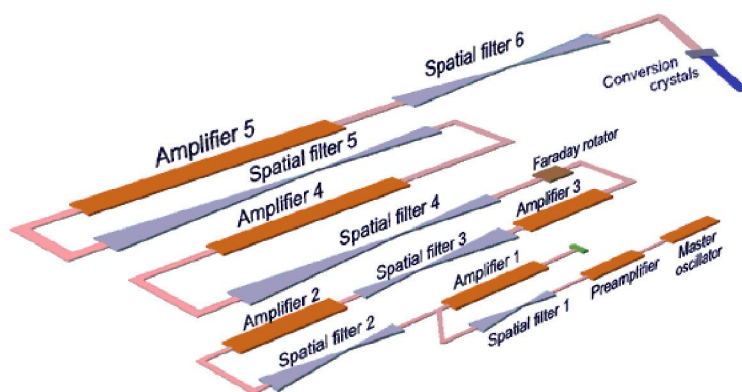
V předchozích částech byly popsány základní součásti laserů a některé druhy provozu. Nyní budou popsány některé používané systémy. Vybral jsem takové aplikace, aby byly zastoupeny různé velikosti, výkony a režimy.

## 4.1 Prague Asterix Laser System

Jak již název napovídá, nyní bude popsán systém, který se nachází v Praze, přesněji v části Praha 8 na ulici Za Slovankou. PALS je společné pracoviště Ústavu fyziky plazmatu a Fyzikálního ústavu AV ČR, které bylo zřízeno v roce 1998. Laser byl do Prahy převezen z Německa a nyní patří k nejvýkonnějším v Evropě.

Aktivní prostředí tvoří směs argonu a alkyldiodu ( $C_3F_7I$ ). Argon se zesílí přímo neúčastní, slouží jen pro rozředění alkyldiodu a pro odvod tepla. UV výbojkou se disociuje jód z molekuly, přičemž jeho elektronový obal je excitován. Tím je dosažena nutná inverze. Při stimulované emisi se vyžáří foton o vlnové délce 1315 nm.

Při výstřelu pulzu se nejdříve generuje několik malých pulzů, z nichž se vybere ten s nejvyšší intenzitou. Paprsek je poté zesílen v pěti laserových zesilovačích. Přitom je nutné paprsek rozšířit, aby nedošlo ke zničení odrazných zrcadel. Dalším důležitým prvkem je Faradayův rotátor, který zabraňuje zpětnému průchodu odražených paprsků, což by mohlo vést ke zničení prvních zesilovačů. Po závěrečném zesílení je paprsek přiveden do reakční komory a zaostřen až na 0,1 mm. Tím je dosaženo tak velkého plošného výkonu (až  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>), že se každá látka přemění na plazma, které je pak zkoumáno.



Obrázek 6: Prague Asterix Laser System

Výstupní svazek má tedy vlnovou délku 1315 nm, lze jej zkonvergovat na druhou nebo třetí harmonickou. Účinnost konverze na třetí harmonickou je 55%. Dosahovaná délka pulzu je 300 – 400 ps. Maximální pulzní výkon je 3 TW, maximální energie 1000 J. Výstupní průměr svazku je 290 mm. AVČR získala tento systém za symbolickou jednu marku.

## 4.2 Laserové ukazovátko

Laserové ukazovátko je, narozdíl od předešlého systému, běžně dostupné a také běžně používané, například při prezentacích. Červená ukazovátka mají obvykle jako aktivní prostředí laserovou diodu (GaInP), zatímco zelená a modrá bývají pevnolátkové lasery buzené diodou a vybavené násobičem frekvence. Jako zdroj se používá obyčejná baterie. Výkon bývá malý, maximálně 5 mW. I takový výkon může způsobit poškození oka, pokud je záření vystaveno déle. I při krátkém pohledu se může dostavit dočasné oslepení.

## 4.3 Operace očí

V posledních letech je čím dál tím populárnější odstraňování vad očí pomocí laseru. Vyvinuly se tři hlavní metody, PRK, LASIK a LASEK. Základem všech je excimerní laser. V roce 1980 se ukázalo, že právě UV excimerním laserem je možné velmi přesně leptat vazivové tkáně, aniž by došlo k tepelnému poškození okolí. V roce 1990 pak byla provedena první operace očí metodou LASIK.

Aby bylo možné oko operovat, je nutné na začátku seříznout tenkou lamelu. To lze provést buď speciálním nástrojem mikrokeratomem, nebo femtosekundovým laserem. Uvádí se, že tato část prováděná laserem může trvat jen 35 s. Poté se jiným laserem upravuje zakřivení rohovky, což vede k vyrovnání vady.

V ČR patří mezi nejznámější a nejlepší centra Gemini ve Zlíně. Zde používají femtosekundový laser Ziemer Femto LDV. Pracuje v režimu synchronizace módů, aktivní prostředí tvoří dopované Ytterbium, které je buzené diodovým laserem. Zářívá na vlnové délce 1040 – 1060 nm a má výkon 800 W. Frekvence opakování pulzů je vyšší než 1 MHz. Na úpravy rohovky se používá laser Allegretto Wave. Jedná se o excimerní ArF laser zářící na 193 nm. Pracuje v pulzním režimu, přičemž doba trvání pulzu je 12 ns a frekvence 200 Hz.

Aktuální cena za operaci krátkozrakosti zahrnující před- i pooperační vyšetření za jedno oko je 16000 Kč, příprava oka femtosekundovým laserem vyjde na 3000 Kč.

## 5 Závěr

V úvodní části této seminární práce byla shrnuta historie laserů. V dalších částech byly popsány základní části a principy činnosti laseru. Na závěr byly popsány některé aplikace.

## Reference

- [1] Albert Einstein. *Zur Quantentheorie der Strahlung*. Physik. Z. 18, str. 121
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser> a zde uvedené odkazy
- [3] <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [4] <http://www.goc.cz>
- [5] <http://www.ziemergroup.com/home/products/ldv.html>
- [6] <http://www.allegretto-wave.com/>
- [7] <http://www.pals.cas.cz/pals/indexcz.html>